

УДК 537.871.53

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОЙ РЕШЕТЧАТОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2023 г. А. М. Бровко<sup>1</sup>, К. Р. Джикирба<sup>1</sup>, В. М. Муравьев<sup>1</sup>, И. Ш. Бахтеев<sup>1</sup>, С. Ю. Молчанов<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук,  
Черноголовка, Россия

\*E-mail: canishe@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Предложен однослойный поляризатор, преобразующий линейную поляризацию в круговую. Преобразователь поляризации состоит из решетчатой структуры, выполненной из кремния. Поляризатор разработан и оптимизирован для миллиметрового диапазона, в частности для “окна прозрачности” на длине волны 2 мм. Полученные результаты показывают хорошее согласование между измеренными значениями и результатами моделирования.

DOI: 10.31857/S0367676522700338, EDN: AEDETD

### ВВЕДЕНИЕ

В системах связи СВЧ диапазона широко используются преобразователи поляризации. Дальнейшее развитие таких систем направлено на расширение рабочей полосы до КВЧ диапазона. Очевидными преимуществами КВЧ диапазона (30–300 ГГц) являются более высокая разрешающая способность радиолокационных систем, более высокое быстродействие и большое количество каналов связи, возможность применения сверхширокополосных сигналов, меньшие габариты и масса аппаратуры. По сравнению с оптическим, КВЧ диапазон также имеет преимущества, такие как уверенное прохождение электромагнитного излучения в окнах прозрачности при любых погодных условиях.

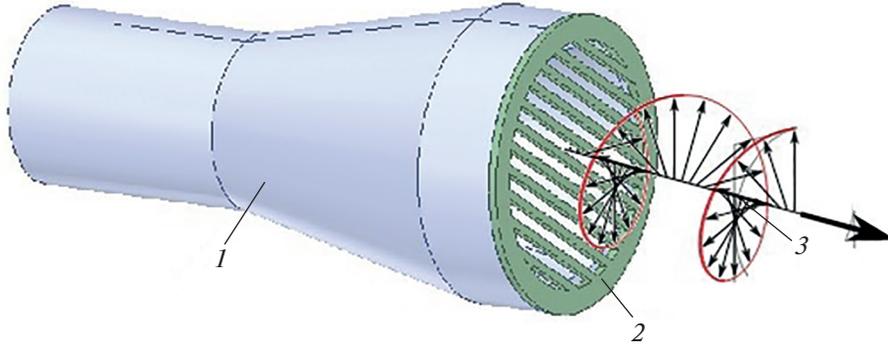
Освоение коротковолновой части миллиметрового диапазона требует создания принципиально новой компонентной базы. На сегодняшний день проблема создания простого и в то же время эффективного преобразователя линейной поляризации в круговую поляризацию не решена для диапазона длин волн около 2 мм, являющегося одним из “окон прозрачности” КВЧ диапазона.

Преобразователи линейной поляризации в круговую для возможности применения в рупорных антеннах бывают следующих типов: диэлектрические [1–6], металлические [7–9] и комбинированные [10–18]. Также они различаются по типам и технологиям изготовления. Например,

наиболее распространенные технологии — это технология поляризаторов меандровой линии [17, 18], чередующиеся диэлектрические пластины [5], искусственно созданные анизотропные диэлектрики [6], повторяющиеся апертурные элементы в виде вырезов в металле [7–9] и металлизации на диэлектрическом основании [10–12]. Причем металлизация на диэлектрическом основании может быть многослойной [13–16]. Однако большинство из этих концепций не могут быть легко реализованы в миллиметровом диапазоне длин волн, где допуски по размерам являются критическими и требуется точное повторяемое производство.

### РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ РЕШЕТЧАТОЙ СТРУКТУРЫ

Преобразование линейной поляризации в круговую происходит при становлении двух ортогональных компонент поля  $E_x$  и  $E_y$  равных друг друга с разностью фаз  $90^\circ$ . Как уже было сказано выше, способы получения электромагнитной волны с круговой поляризацией могут быть различными. Искусственно созданные анизотропные диэлектрики, являются наиболее перспективными для освоения КВЧ диапазона. Во-первых, изготовление таких устройств может быть массовым, что положительно скажется на итоговой цене. Во-вторых, из-за однородного состава в таких устройствах электрические характеристики



**Рис. 1.** Преобразователь поляризации вместе с рупорной антенной: 1 – рупорная антенна, 2 – преобразователь поляризации, 3 – круговая поляризация.

не будут зависеть от температуры окружающей среды, в отличие от структур с дипольным эффектом на металлических элементах. В-третьих, в таких структурах, как правило, очень малое отражение и высокий уровень прохождения электромагнитной волны в рабочем диапазоне длин волн. В-четвертых, диэлектрические преобразователи поляризации являются широкополосными [6]. Подробный анализ всех типов преобразователей поляризации, которые могут быть реализованы в миллиметровом диапазоне, приведен в работе [19].

В качестве прототипа анизотропного диэлектрика была выбрана решетчатая структура, сформированная на кремниевой пластине. Кремниевые пластины ранее применялись для создания преобразователя поляризации, но лишь в качестве подложки [20]. Провести оценку анизотропии диэлектрика с искусственно созданными вырезами можно по формулам эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\vartheta \epsilon_1 + (1 - \vartheta) \epsilon_2}, \quad (1)$$

$$\epsilon_y = \vartheta \epsilon_2 + (1 - \vartheta) \epsilon_1, \quad (2)$$

где  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $\epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость материала,  $\vartheta$  – объемная концентрация, описывающая долю диэлектрического материала в общем объеме. Следовательно, фазовая скорость распространяющейся волны с поляризацией вдоль оси  $Y$  является более медленной, чем по оси  $X$ , что приводит к двум различным фазовым сдвигам  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$ , когда волны пройдут через диэлектрический материал. Учитывая, что магнитная проницаемость  $\mu = 1$ , формула для расчета разности фаз выглядит следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y = 2\pi(\sqrt{\epsilon_y} - \sqrt{\epsilon_x})\frac{h}{\lambda}, \quad (3)$$

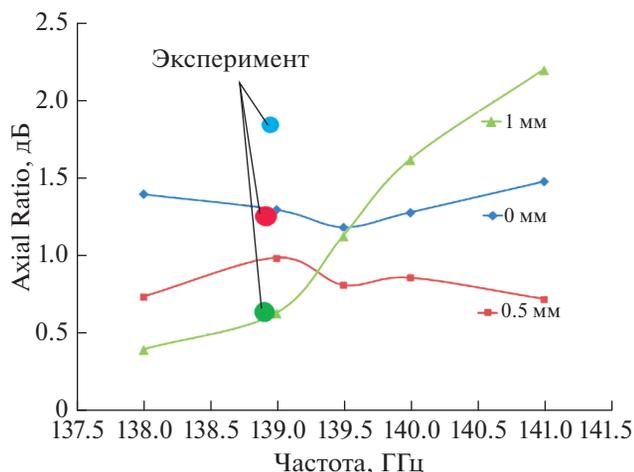
где  $h$  – толщина,  $\lambda$  – длина волны.

Для расчета итоговых электрических параметров можно использовать программы электродинамического моделирования CST, HFSS, Comsol и др. Причем для достижения наилучшего результата рекомендуется учитывать геометрию рупора, совместно с которым будет использоваться преобразователь поляризации. Для двухмиллиметрового диапазона оптимальная толщина кремниевой пластины должна быть в пределах 400–450 мкм. Модель поляризатора из кремния с рупорной антенной представлена на рис. 1. Для получения круговой поляризации необходимо повернуть поляризатор на  $45^\circ$ . Полученные при моделировании значения осевого соотношения (Axial Ratio) были на уровне 0.2 дБ на частоте 139 ГГц.

#### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сразу хотим отметить, что нам не удалось с первого раза попасть в точные размеры преобразователя поляризации. Поэтому представленные расчетные данные осевого соотношения на рис. 2 относятся к размерам, полученные по факту изготовления.

Для создания диэлектрических поляризаторов в данной работе применялись пластины высоко-резистивного кремния толщиной 420 мкм. С помощью лазерной резки из пластин вырезались дисковые образцы диаметром 16 мм, на которых формировалась решетчатая структура с периодом 990 мкм ( $\pm 10$  мкм). В исследовании использовались два типа структур: с шириной струн решетки 332 мкм ( $\pm 10$  мкм) и с шириной 374 мкм ( $\pm 10$  мкм). Внешний размер преобразователей поляризации подбирался таким образом, чтобы образцы могли быть расположены в качестве насадки на типовой конический рупор. Генератор фирмы ООО “МВЭЙВ” [21] на основе ЛПД (лавинно-пролетный диод) в нашем исследовании представлен как ЛПД-источник. Мощность гене-



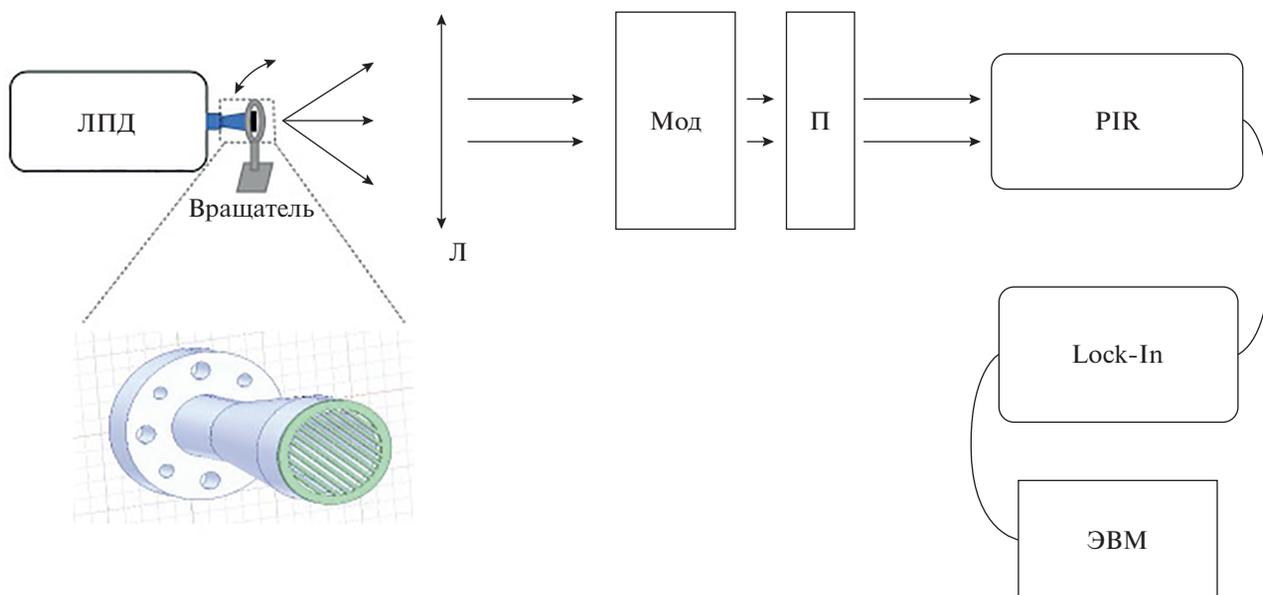
**Рис. 2.** Результаты моделирования осевого отношения образца #2 и экспериментальные значения, полученные на частоте 138.9 ГГц.

ратора составляла 80 мВт, частота излучения 138.9 ГГц.

На рис. 3 изображена схема экспериментальной установки. На выход генератора был установлен конический металлический рупор, на выходе из которого формировался близкий к гауссовому распределению пучок излучения вертикальной поляризации. На рупор устанавливалась кольцевидная насадка, в центре которой находился изучаемый решетчатый преобразователь поляризации, который вплотную прижимался к выходу ру-

пора. Кольцевая насадка, в свою очередь, крепилась к специальному вращателю с помощью прижимных болтов. Такая конструкция позволяла осуществлять прецизионные настройки позиционирования путем вращения. Преобразование расходящегося пучка в параллельный осуществлялось следующим образом: на оптический тракт помещалась линза (Л), следом за которой располагался вентилятор-отсекатель (Мод) для модуляции частоты излучения (23 Гц). Следующим элементом оптической системы был решетчатый поляризатор (П) с вращением 360°, который использовался для характеристики излучения и определения степени “циркулярности” его поляризации. В случае идеальной круговой поляризации изменение угла поляризатора (П) не должно было изменять интегральную мощность прошедшего через него излучения на детекторе. Детектирование излучения осуществлялось при помощи пиродетектора (PIR), подключенного к Lock-In усилителю (Lock-In), где происходила регистрация значений интегральной мощности сигнала.

Общий алгоритм измерения осевого отношения (Axial Ratio) выглядел следующим образом: насадка с преобразователем поляризации устанавливалась на выход рупора генератора и закреплялась прижимными болтами вращателя, затем происходило прецизионное позиционирование образца, которое оценивалось таким образом, чтобы при вращении поляризатора (П) на 360° (шаг вращения 10°) показание мощности сигнала на Lock-In усилителе изменялось наи-



**Рис. 3.** Блок-схема экспериментальной установки, где: ЛПД – генератор на основе ЛПД, Вращатель – механическая система с фиксирующими болтами, Л – линза, Мод – вентиляторный отсекающий, используемый для модуляции, П – поляризатор, PIR – пиродетектор, Lock-In – усилитель, ЭВМ – управляющий компьютер.

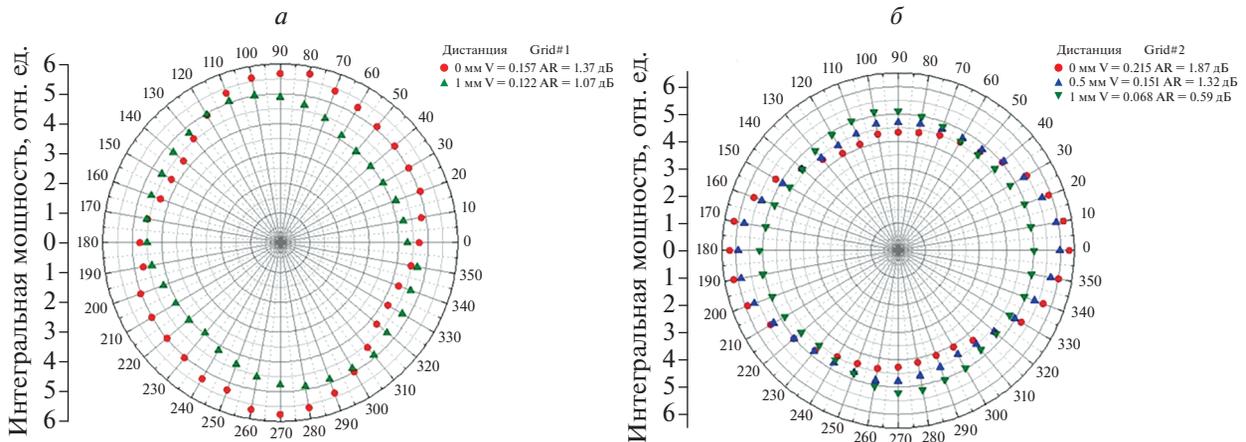


Рис. 4. График зависимости интегральной мощности КВЧ излучения при прохождении через образец от углового положения поляризатора (П) при различном удалении образца от рупора генератора: Grid#1 с толщиной стержней 332 мкм (а), Grid#2 с толщиной стержней 374 мкм (б).

меньшим образом при изменении угла положения поляризатора (П). При нахождении оптимального положения образца осуществлялась последовательная регистрация мощности сигнала для каждого углового положения поляризатора (П). Для большей точности измерения, для каждого угла поляризатора (П), пиродетектором производилось сканирование по площади  $4 \times 4 \text{ см}^2$ , что соответствует площади параллельного пучка субтерагерцового излучения в нашей экспериментальной системе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые образцы преобразователей поляризации были выполнены по технологии лазерной резки и представляли решетчатую структуру с периодом  $T = 990 \text{ мкм}$  и шириной стержней 332 мкм для Grid#1 и 374 мкм для Grid#2. Для каждого образца были проведены измерения в 36 точках, соответствующих разному углу поляризатора (П). Для наглядной визуализации результатов измерения была построена круговая диаграмма, где длине радиуса соответствует интегральная мощность, а по окружности отложены углы поворота поляризатора (П). В случае наличия идеальной круговой поляризации множество точек на графике должно образовать окружность. В качестве дополнительных индикаторов используются два параметра, представленных в легенде графика:  $V$  и  $AR$ , где  $V$  – параметр видности, определяемый по формуле:

$$V = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}, \quad (4)$$

где  $P_{max}$  – максимальное значение интегральной мощности на измеренных углах положения поляризатора (П);  $P_{min}$  – минимальное значение соответственно.

Осевое отношение  $AR$  определялось по формуле:

$$AR = \frac{P_{max}}{P_{min}}. \quad (5)$$

На рис. 4а представлены результаты измерений для образца Grid#1. Первое измерение, представленное в виде (●) на рис. 4а, происходило по описанному в предыдущем разделе алгоритму, когда измеряемый образец установлен вплотную к выходу генератора. Однако, из-за полученных при изготовлении размеров, отличных от ожидаемых, даже при самой прецизионной настройке положения Grid#1 полученные результаты оказались достаточно далеки от достижения круговой поляризации: максимальная и минимальная амплитуды мощности отличаются в 1.37 раза, что соответствует  $AR = 1.37 \text{ дБ}$ . Было принято решение оптимизировать работу преобразователя поляризации, изменив его положение относительно выхода рупора генератора. Насадка с образцом, зафиксированная болтами вращателя, оставалась в стационарном положении, а генератор излучения с выходным рупором был отодвинут от преобразователя поляризации на 1 мм. Измерение при таком положении образца (▲) показало улучшенные результаты, и соотношение  $AR$  уменьшилось до 1.07 дБ.

Рисунок 4б отображает результаты измерений для второго образца (Grid#2). Установленный в упор к выходу рупора генератора Grid#2 отчетливо демонстрировал поляризацию, близкую к эллиптической (значение  $AR = 1.87 \text{ дБ}$  ((●) на графике). Как и в случае с первым образцом, была произведена попытка оптимизации его положения путем его дистанцирования от выхода рупора генератора на 1 (▼) и 0.5 мм (▲).

Второй образец оказался крайне чувствителен к донастройке положения относительно выхода рупора генератора. Так, при расстоянии между рупором и Grid#2 в 1 мм, удалось достичь круговой поляризации со значением Axial Ratio близким к идеальному ( $AR = 0.59$  дБ). Измеренные значения ( $\blacktriangledown$ ), похожие на практически идеальный круг, хорошо заметны на рис. 4а.

Полученные экспериментальным путем значения для Grid#2 наложены на данные, полученные при моделировании осевого отношения в диапазоне 138–141 ГГц. Тенденция к уменьшению осевого отношения при удалении образца от рупорной антенны также прослеживается и при теоретическом расчете кремниевой решетки с толщиной стержней 374 мкм, представленного на рис. 2.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа представляет предварительные результаты исследования тонких кремниевых решетчатых преобразователей поляризации для эффективного преобразования линейно-поляризованного субтерагерцового излучения в циркулярно-поляризованное.

Для одного из экспериментальных образцов удалось получить поляризацию с очень малым коэффициентом  $AR$  (0.594 дБ), что показывает принципиальную возможность получения круговой поляризации используя такой тип кремниевых структур.

Исследования в данной области имеют большую прикладную важность, поскольку успешное создание преобразователя поляризации в виде съемной насадки для выходного рупора источника излучения, станет удачным технологическим решением для компонентной базы миллиметрового диапазона, повысит качество и функционал подобных устройств.

Результаты представленной статьи стоит рассматривать как промежуточные перед оптимизацией технологических процессов изготовления решетчатых структур. В дальнейшем планируется разработка и изготовление подобных преобразователей поляризации для длины волны 1 мм.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФТТ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kirschbaum H.S., Chen S.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1957. V. 5. No. 3. P. 199.
2. *Smith P.W.* Monolithic polarizer grating. US Patent No. 45516925, cl. 333/21A, H01P 1/16. 1985.
3. *Volman V., Harris D.W.* Passive electromagnetic polarization shifter with dielectric slots. US Patent No. 8519899, cl. 343/756, H01O 19/00. 2013.
4. *Redd J.* Polarization converting dielectric plate. US Patent No. 0266977, cl. 343/911R, H01Q 15/244. 2014.
5. *Bornemann J.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 1993. V. 41. No. 11. P. 1588.
6. *Wang K.X., Wong H.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2018. V. 66. No. 8. P. 4303.
7. *Roberts A., Lin L.* // Opt. Lett. 2012. V. 37. No. 11. P. 1820.
8. *Euler M., Fusco V., Dickie R. et al.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2011. V. 59. No. 8. P. 3103.
9. *Biscarini M., Sardi G.M., Martini E. et al.* // Proc. EuCAP'13. (Gothenburg, 2013).
10. *Clendinning S., Cahill R., Zelenchuk D., Fusco V.* // Microwave Opt. Technol. Lett. 2020. V. 62. No. 4. P. 1815.
11. *Clendinning S., Cahill R., Zelenchuk D., Fusco V.* // Proc. 13th EuCAP (Krakow, 2019). P. 1.
12. *Karamirad M., Ghobadi C., Nourinia J. et al.* // Proc. KBEI–2017. (Tehran, 2017). P. 69.
13. *Li Y., Zhang J., Qu S. et al.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. No. 4. Art. No. 044501.
14. *Sofi M.A., Saurav K., Koul S.K.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2020. V. 68. No. 10. P. 4138.
15. *Orr R., Goussetis G., Fusco V., Saenz E.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2015. V. 63. No. 5. P. 1949.
16. *Wang H.B., Cheng Y.J., Chen Z.N.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2019. V. 68. No. 2. P. 1186.
17. *Tharp J.S., Lail B.A., Munk B.A., Boreman G.D.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2007. V. 55. No. 11. P. 2983.
18. *Fei P., Shen Z., Wen X., Nian F.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2015. V. 63. No. 10. P. 4609.
19. *Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю., Муравьев В.М., Гусихин П.А.* // Изв. РАН Сер. физ. 2022. Т. 86. № 4. P. 489; *Bahteev I.S., Molchanov S.Y., Muravev V.M., Gusikhin P.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 4. P. 400.
20. *Euler M., Fusco V., Cahill R., Dickie R.* // IEEE Trans. Antenn. Propag. 2010. V. 58. No. 7. P. 2457.
21. <https://emwave.ru/terahertz-systems/generatory-ter-agertsovogo-izlucheniya>.

### Sub-terahertz polarization converter based on a silicon lattice structure

**A. M. Brovko<sup>a</sup>, K. R. Dzhikirba<sup>a</sup>, V. M. Muravev<sup>a</sup>, I. Sh. Bahteev<sup>a</sup>, S. Yu. Molchanov<sup>a,\*</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

\**e-mail: canishe@yandex.ru*

A single-layer polarizer converting linear polarization into circular one is presented. The polarization converter consists of a lattice structure made of silicon. The polarizer is developed and optimized for the millimeter wave band, for the spectral ‘transmission window’ of 2 mm. The obtained results show that the measured values are in line with the simulation results.